

PROJETO DE UM SISTEMA DE TRIGERAÇÃO PARA DIFERENTES DEMANDAS DE UTILIDADES EM UM PROCESSO INDUSTRIAL

J. P. TAMOYO¹, J. V. H. D'ANGELO¹

¹ Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química
Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos
E-mail para contato: dangelo@feq.unicamp.br

RESUMO – O presente trabalho objetiva analisar a influência de variáveis operacionais de um sistema de trigeração sobre a distribuição das utilidades geradas, visando atender a demandas típicas de calor, frio e potência em três diferentes processos industriais definidos como estudos de caso: uma planta de fertilizantes da empresa J.R. Simplot; uma planta para a produção de ácido acético e uma planta de etilenoglicol. Os parâmetros operacionais estudados foram: porcentagem de ar em excesso, razão de compressão e expansão, vazão molar de combustível alimentado ao ciclo de potência, temperatura e fração molar de refrigerante na corrente de entrada do gerador para o ciclo de refrigeração por absorção. As simulações foram realizadas utilizando-se o software Aspen Hysys® versão 7.3, o qual gerou algumas planilhas de dados a cada nova combinação de variáveis efetuada. Essas planilhas foram transferidas ao Excel para a construção de gráficos que facilitaram a análise dos resultados obtidos. Posteriormente, a ferramenta *Optimizer* oferecida pelo software comercial foi utilizada a fim de promover a variação simultânea das variáveis de interesse, determinando a condição ótima de operação do sistema para garantir o maior aproveitamento energético, maximizando o COP e a eficiência global do sistema.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de trigeração referem-se à produção simultânea de trabalho mecânico (empregando-se um ciclo de potência), frio (a partir de um ciclo de refrigeração) e calor (obtido na forma de vapor mediante troca térmica), empregando-se para tal uma única fonte de energia primária. A utilização de um sistema de trigeração resulta em uma melhoria no rendimento total do ciclo, proporcionando uma redução dos custos do processo, bem como a minimização dos impactos ambientais, ao contribuir para a diminuição da emissão dos gases causadores do efeito estufa.

Os produtos obtidos mediante o emprego de um sistema de trigeração denominam-se utilidades e possuem diversas aplicações em diferentes tipos de ambientes comerciais e industriais. Daolin e Shifei (1999) analisaram o emprego da trigeração em um hospital, Marimón *et al.* (2011) estudaram a aplicação deste sistema em supermercados e Immovilli *et al.* (2008) avaliaram as aplicações residenciais desse sistema por meio do emprego de energia solar.

A implementação de sistemas de trigerção apresenta como principal vantagem a sua elevada eficiência térmica. A integração de subsistemas de resfriamento e aquecimento a uma planta convencional permite o aumento da eficiência da mesma para 80% (Al-Sulaiman *et al.*, 2011). Também é válido ressaltar que o impacto ambiental gerado por sistemas de trigerção é muito menor quando comparado a sistemas convencionais, uma vez que aqueles consomem uma quantidade menor de combustível e geram menos poluentes.

Em plantas convencionais de geração de potência o dispositivo de geração de trabalho tem a função de converter parte do calor proveniente da fonte de energia primária em energia mecânica (Smith *et al.*, 2007). A fonte única de energia primária é, em geral, a energia química de um combustível, liberada mediante o processo de combustão. A obtenção da utilidade fria pode ser alcançada mediante o emprego de um ciclo de refrigeração por absorção. Este sistema envolve a absorção do refrigerante por um meio de transporte (absorvente). O sistema mais comumente empregado é o de água-amônia, em que a amônia é o refrigerante e a água o absorvente.

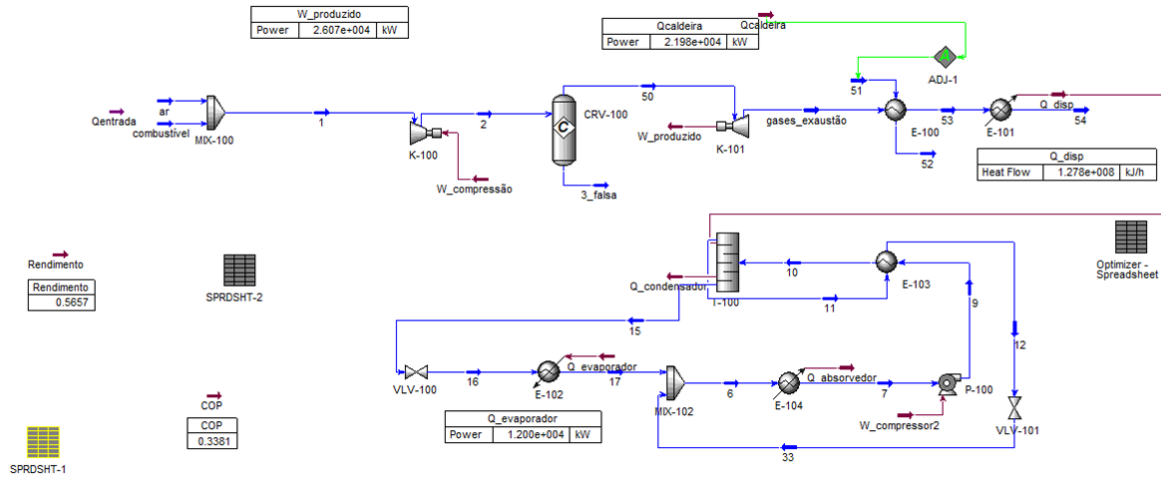
O objetivo deste trabalho é estudar, por meio de simulações computacionais, a influência das principais variáveis operacionais de um sistema de trigerção (pressões, temperaturas, etc) sobre a distribuição das utilidades geradas, visando atender a demandas típicas de calor, frio e potência em diferentes processos industriais: planta de fertilizantes da empresa J.R. Simplot (Caso 1), uma planta para a produção de ácido acético (Caso 2) e uma planta de etilenocícol (Caso 3).

2. METODOLOGIA

Baseando-se nos artigos de Calva *et al.* (2005), Collona e Gabrielli (2003) e Abdelmessih *et al.* (2007) um sistema de trigerção foi montado objetivando-se estudar a influência de variáveis operacionais sobre a distribuição das utilidades geradas (calor, frio e potência), a fim de se atender a demandas típicas destas utilidades em diferentes processos industriais. A eficiência global do sistema e o coeficiente de desempenho (COP, do inglês “*coefficient of performance*”) do ciclo de refrigeração por absorção também foram alvos de estudos, visando sua maximização. Utilizou-se como ferramenta para o desenvolvimento das simulações o software Aspen Hysys® versão 7.3, empregando-se o pacote termodinâmico Peng-Robinson-Stryjek-Vera (PRSV). A planta de trigerção empregada neste estudo a fim de se atingir o objetivo deste projeto encontra-se representada pela Figura 1.

Estudou-se a influência da variação da razão de compressão (RC) (relação entre as pressões de saída e de entrada do compressor) e da porcentagem de ar em excesso no rendimento global do sistema, assim como a influência exercida no COP pela composição da mistura refrigerante/absorvente empregada no ciclo de refrigeração por absorção. O ciclo de refrigeração para produção de frio empregado nesse projeto utilizou como par absorvente/refrigerante a combinação água/amônia, enquanto o gás natural (90% metano e 10% etano, em base molar) foi o combustível empregado no ciclo de potência. As equações de (1) a (5) foram utilizadas na determinação do rendimento global do sistema e do COP do ciclo de refrigeração por absorção.

Figura 1 – Planta de trigeração simulada objetivando-se o estudo da influência e da sensibilidade dos parâmetros operacionais sobre o ciclo.



$$\eta = \frac{\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{compressor}}{\dot{Q}_{caldeira}} \quad (1)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evaporador}}{\dot{Q}_{gerador}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{E_{total}}{\dot{Q}_{fornecido}} \quad (3)$$

$$E_{total} = \dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{compressor} + \dot{Q}_{evaporador} + \dot{Q}_{caldeira} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{fornecido} = \sum_{i=1}^n x_i \dot{n}_{combustivel} \cdot PCI_i \quad (5)$$

O rendimento do ciclo de potência (η) foi calculado pela relação entre a diferença de trabalhos da turbina ($\dot{W}_{turbina} [kW]$) e do compressor ($\dot{W}_{compressor} [kW]$) pelo calor gerado na caldeira ($\dot{Q}_{caldeira} [kW]$). O COP também se apresenta como uma relação entre as taxas de calor do evaporador ($\dot{Q}_{evaporador} [kW]$) e do gerador ($\dot{Q}_{gerador} [kW]$). A energia total referente ao sistema de trigeração ($E_{total} [kW]$) define-se pelo balanço entre as entradas e saídas de energia, podendo estas se apresentarem na forma de calor ou trabalho. O calor fornecido ao ciclo ($\dot{Q}_{fornecido} [kW]$) refere-se ao combustível alimentado, sendo exposto pelo somatório do produto da fração molar de cada componente (x_i) pela vazão molar alimentada ($\dot{n}_{combustivel} [kmol/h]$) pelo poder calorífico inferior (PCI [kJ/kmol]).

3. RESULTADOS E CONCLUSÃO

As Figuras 2 e 3 representam a variação da eficiência do ciclo de potência, em porcentagem, quando da variação da razão de compressão (RC) e da porcentagem de ar em excesso alimentado ao ciclo.

Figura 2 – Variação da eficiência do ciclo de potência em função da razão de compressão.

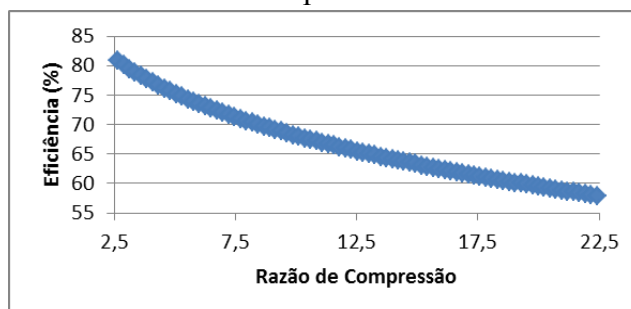
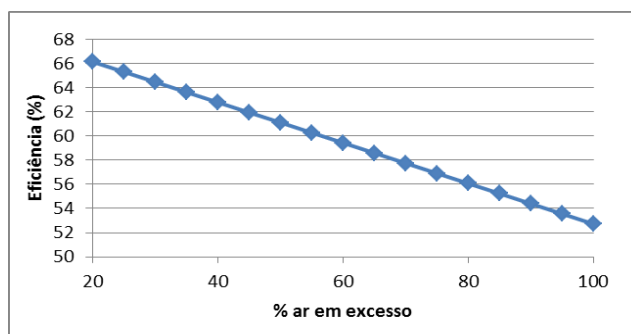


Figura 3 – Variação da eficiência do ciclo potência em função da porcentagem de ar.

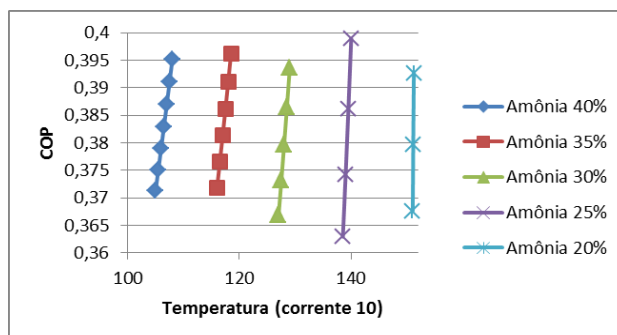


Percebe-se, pela análise da Figura 2, que a diminuição da razão de compressão provoca aumento da eficiência global, seguindo um comportamento não linear. A Figura 3 demonstra que quanto menor a porcentagem de ar em excesso admitida na corrente de entrada maior será a eficiência global do sistema de trigerção simulado, apresentando comportamento linear.

A análise da Figura 4 permite avaliar a variação do COP do ciclo de refrigeração por absorção em função da variação da fração molar de refrigerante (amônia) e da temperatura na corrente de entrada do gerador (corrente 10). De acordo com a Figura 4 o aumento da fração molar de amônia na corrente que alimenta o gerador (corrente 10) provoca diminuição nos valores e aumento na faixa de temperatura que esta mesma corrente pode assumir de forma a não comprometer a operação do sistema de refrigeração por absorção.

Três diferentes processos industriais foram tomados como estudo de caso. Coletaram-se dados de demandas típicas de potência e vapor de processo de uma planta de fertilizantes da empresa J.R. Simplot, compondo o primeiro caso de estudo. Os dados foram retirados de um relatório técnico do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2013), obtendo-se as demandas de 26.070 kW de potência e 21.980 kW de vapor superaquecido. Os demais estudos de caso foram retirados de um relatório técnico da Agência Internacional de Energia (International Energy Agency). Como segundo estudo de caso, dados de demandas típicas de potência e vapor de processo de uma planta de ácido acético foram coletados, obtendo-se as demandas de 19.026 kW de potência e 156.012 kW de vapor superaquecido. As demandas de 1.966 kW de potência e 34.405 kW de vapor superaquecido compõem os dados do terceiro caso analisado, referentes a uma planta para a produção de etilenoglicol.

Figura 4 – Variação do COP função da fração molar de refrigerante e da temperatura da corrente que alimenta o gerador (corrente 10).



O trabalho mecânico produzido pela turbina ($W_{\text{produzido}}$) teve seu valor fixado de maneira a atender às demandas de potência encontradas para cada um dos processos industriais em estudo. De maneira análoga, o calor produzido na caldeira na forma de vapor de processo (Q_{caldeira}) também teve seu valor fixado a fim de suprir as demandas por vapor superaquecido em cada estudo de caso. Para que isso fosse possível, a ferramenta ADJUST (ADJ-1) foi empregada objetivando-se ajustar a vazão de água na caldeira para possibilitar a geração da quantidade de vapor desejada. A taxa de refrigeração assumiu valores diferentes em cada caso estudado. Para a planta de fertilizantes (Caso 1) obteve-se uma taxa de refrigeração de 12.000 kW; para a planta de ácido acético (Caso 2) esta taxa foi de 12.030 kW e para a planta de produção de etilenoglicol (Caso 3), 12.410 kW.

O conhecimento da sensibilidade dos parâmetros operacionais analisados sobre os índices de desempenho do sistema (eficiência global e COP) foi de suma importância no que se refere à tentativa de melhorar o rendimento dos ciclos, a fim de se obter aproveitamento energético otimizado. Para atingir esse objetivo fez-se uso da ferramenta *Optimizer*, que possibilita a variação simultânea dos parâmetros de interesse a fim de maximizar ou minimizar determinada função objetivo, permitindo obter uma combinação ótima dos parâmetros operacionais que garantam a convergência da simulação. Esta ferramenta foi empregada nos três estudos de caso avaliados nesse projeto, objetivando-se a maximização tanto do COP como da eficiência global do sistema. Para isso a vazão de combustível alimentada ao sistema, a pressão da corrente que deixa o compressor (corrente 2) e a pressão da corrente que deixa a turbina (corrente gases_exaustão) foram escolhidas como parâmetros para a otimização da eficiência. Para a avaliação do COP a temperatura da corrente de entrada do gerador (corrente 10), a pressão de operação do gerador e a pressão de saída da bomba (corrente 9) foram as variáveis manipuladas. A Tabela 1 resume os resultados obtidos antes e após a otimização.

Tabela 1 – Comparação dos valores assumidos pela eficiência e pelo COP dos sistemas em estudo antes e após a otimização, incluindo a porcentagem de melhora.

Caso	Eficiência Original (%)	Eficiência Otimizada (%)	COP Original	COP Otimizado	Aumento do COP (%)
Fertilizantes	56,57	75,02	0,3381	0,3963	17,21
Ác. Acético	61,10	87,13	0,3387	0,3960	16,92
Etilenoglicol	49,83	75,30	0,3460	0,4041	16,79

De acordo com os resultados expostos na Tabela 1 fica evidente a melhora promovida pelo uso da ferramenta *Optimizer*, permitindo o ajuste dos parâmetros operacionais de forma a garantir o melhor aproveitamento energético para os ciclos. O pacote termodinâmico escolhido, bem como o simulador de processos utilizado, mostraram-se adequados e foram validados comparando-se os resultados das simulações com dados obtidos da literatura. As variáveis analisadas se mostraram importantes para avaliar alternativas de melhorias de processo. As eficiências otimizadas situam-se numa faixa típica de sistemas de trigeração e demonstraram a importância de uma análise cuidadosa da influência das variáveis operacionais.

4. REFERÊNCIAS

- ABDELMESSIH, A.N.; ABBAS, M.; AL-HASHEM, A.; MUNSON, J.; "Ethylene glycol/water as working fluids for an experimental absorption cycle", 20, pp. 87-102, 2007.
- AL-SULAIMAN, F.A.; HAMDULLAHPUR, F.; DINÇER, I.; "Trigeneration: a comprehensive review based on prime movers", Int. J. of Energy Research, 35, pp. 233-258, 2011.
- CALVA, E.T.; NÚÑEZ, M.P.; RODRIGUEZ TORAL, M.A., "Thermal integration of trigeneratin systems", Applied Thermal Engineering, 25, pp. 973-984, 2005.
- COLONNA, P.; GABRIELLI, S.; "Industrial trigeneration using ammonia-water absorption refrigeration systems (AAR)", Applied Thermal Enginnering, 23, pp. 381-396, 2003.
- DAOLIN L.; SHIFEI Z.; "Trigeneration system and their application in Shanghai". American Society of Mechanical Engineers, Power Division (Publication) PWR, vol. 34-2, Burlingame, CA, U.S.A., pp. 265-270, 1999.
- DOE – USA Department of Energy (último acesso em 04 de outubro de 2013). http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/42788.pdf.
- IMMOVILLI, F.; BELLINI, A.; BIANCHINI, C.; "Solar trigeneration for residential applications, a feasible alternative to traditional microcogeneration and trigeneration plants", publicado em *Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008. IAS '08. IEEE, 2008.
- MARIMÓN, M.A.; ARIAS, J.; LUNDQVIST, P.; BRUNO, J.C.; CORONAS, A.; "Integration of trigeneration in an indirect cascade refrigeration system in supermarkets", Energy and Buildings, 43, pp. 1427-1434, 2011.
- "Potential of best practice technology and other measures for improving energy efficiency" (último acesso em 26 de janeiro de 2015). http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/chemical_petrochemical_sector.pdf.